

対流型交換器の流動と熱伝達に関する研究

著者	岡田 孝夫
号	317
発行年	1971
URL	http://hdl.handle.net/10097/9053

氏 名（本籍）	岡 田 孝 夫 （群馬県）
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 3 1 7 号
学位授与年月日	昭和 4 7 年 3 月 2 4 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	対流型熱交換器の流動と熱伝達に関する研究

(主 査)

論 文 審 査 委 員	教授 武山 斌郎 教授 弓削 達雄
	教授 大塚 芳郎 教授 大谷 茂盛

論 文 内 容 要 旨

最近，ボイラ排煙による大気汚染が大きな社会問題になるにつれて従来の個別暖房方式に代ってボイラを一ヶ所に集中した地域暖房方式が各地で計画，実施されるようになってきた。これにもなって地域暖房方式に特有ないくつかの問題が生じてきている。本論文で対象とする高性能の高温水用対流型熱交換器の開発もその重要な課題の一つである。

対流型熱交換器は適当なケーシングの中に加熱器を納めた構造の熱交換器で，熱交換器の外部流れとしての拡大伝熱面からの自然対流熱伝達およびケーシングによる通風効果，内部流れとしての管内流動および熱伝達がその性能に重要な要素となっている。

本論文は対流型熱交換器の性能に関与すると考えられる二三の要素について考察し，小型，高性能の対流型熱交換器を開発するための指針を得ることを目的としたものである。

第 1 章 序 論

従来の研究結果を概説し、本研究の必要性を述べた。

第 2 章 限定空間における水平円柱からの自然対流熱伝達

対流型熱交換器では適当なケーシングの中に加熱器を納めてケーシングによる通風効果により熱伝達率の向上をはかる。したがって対流型熱交換器の外部流れを伝熱工学的にみた場合には拡大伝熱面からの自然対流熱伝達にケーシングによる通風効果を考慮しなければならない。本章は拡大伝熱面の限定空間における自然対流熱伝達の基礎として、断熱平行平板中に置かれた水平円柱からの自然対流熱伝達について実験的に考察したものである。

実験は蒸留水を用いた水槽中で平均熱伝達率を測定し、断熱平板の存在により平均熱伝達率は減少することを示した。また平均ヌセルト数は $10^6 < G_r P_r < 10^7$ の範囲で

$$N_{um} = C (G_r P_r)^{0.25}$$

で表わされ、定数 C の値は平板間隔の関数で、平板間隔が減少するにつれて単調に減少することを示した。また空気中におけるシュリーレン写真により水平円柱と断熱平板の局所的な干渉の様相を明らかにした。

第 3 章 熱伝達をともなう粘性流体の圧力損失特性と流れの不安定現象

実用の熱交換器では熱伝達特性と流体力学的な圧力損失特性によって熱交換器の性能が評価される。通常の熱交換器では圧力損失特性におよぼす熱伝達の影響は小さい場合が多く、圧力損失特性を熱伝達と分離して解析してもさしつかえない場合が一般的であるが、たとえばボイラ蒸発管内の気液二相流のように熱伝達によって圧力損失特性が著しく変化し、流体力学的な不安定現象が生じる場合もある。本章は熱伝達をともなう粘性流体の管内層流流れの圧力損失特性について、とくに粘性係数の温度変化を考慮した理論的な解析を行ない、粘性係数の温度変化が著しい液体では圧力損失と流量の関係が極大値と極小値をもち、この間で流量に対して圧力損失が負の勾配をもつ不安定な領域が存在することを示し、実験的にこれを確認した。

第 4 章 ディスク型タービュレンスプロモーターによる管内乱流熱伝達

小型、高性能の熱交換器を開発するにあたっては熱交換器の外部流れおよび熱伝達とともに熱交換器の内部流れおよび熱伝達も重要な要素の一つである。とくに近年、熱交換器の小型化、および高熱流束伝熱面開発の要求から管内の熱伝達率の増加を目的とした研究が数多く行なわれるようになってきている。管内の熱伝達率を増加させるにはいくつかの方法が考えられるが、本章はとくに熱伝達率の増加が著しいと考えられるディスク型タービュレンスプロモーターを管内に

挿入したときの圧力損失特性および乱流熱伝達について実験的に考察したものである。

熱伝達率の測定には、とくに局所熱伝達率を測定するため長さ 9 mm 、 14 mm 、 18 mm の三種類の銅製伝熱管エレメントを合計 35 個、それぞれ厚さ 1 mm のベークライトスプーサーで接続して一本の伝熱管としたものを用い、円管の温度助走区間における局所熱伝達率、 $d/D = 0.4 \sim 0.8$ の 5 種類のタービュレンスプロモーターを伝熱管入口に一個挿入したときの局所熱伝達率の変化の様相、およびそれぞれのタービュレンスプロモーターについてプロモーターを一定間隔 ($P/D = 2 \sim 8$) で挿入したときの局所熱伝達率の変化の様相を明らかにした。

またタービュレンスプロモーター挿入管の平均熱伝達率は、本実験範囲のレイノルズ数 $2 \times 10^4 < R_\theta < 6 \times 10^4$ において次式で表わされることを示した。

$$N_{um} = C R_\theta^{0.8} P_r^{0.4}$$

ここに定数 C の値はタービュレンスプロモーターの大きさと設置間隔の関数である。

タービュレンスプロモーターを管内に挿入することによって円管に比べ熱伝達率は増加するが同時に圧力損失も増加する。熱交換器の性能は熱伝達特性と圧力損失特性によって評価されるため、両者を同時に考慮した評価としてポンプ動力を基準としてタービュレンスプロモーター挿入管の有効性について検討した。

第 5 章 同心二重円管の乱流熱伝達

第 4 章で円管内にディスク型タービュレンスプロモーターを挿入したときの乱流熱伝達の実験から、タービュレンスプロモーターの設置間隔が小さいほど平均熱伝達率は大きくなることを明らかにしたが、タービュレンスプロモーターの設置間隔をさらに小さくすると平均熱伝達率は極大値を経て極限としての同心二重円管の平均熱伝達率に漸近すると考えられる。本章はディスク型タービュレンスプロモーターの設置間隔を小さくしたときの極限として、外管表面温度一定、内管断熱の同心二重円管の乱流熱伝達について実験的に考察したものである。

伝熱管はヒーターが長さ 10 mm 毎に分割された局所熱伝達率測定用の伝熱管を用い、内外管径比 $D_i/D_o = 0.4 \sim 0.8$ の 5 種類の同心二重円管について温度助走区間における局所熱伝達率の変化の様相を明らかにし、代表長さとして等価直径 $D_\theta = D_o - D_i$ を用いれば内外管径比によらず同一の曲線で表わされることを示した。

代表長さに等価直径を用いれば発達した領域のヌセルト数は本実験範囲のレイノルズ数 $10^4 < R_\theta < 6 \times 10^4$ では内外管径比によらず次の実験式で表わされる。

$$N_{um} = 0.0176 R_\theta^{0.8} \quad (P_r = 0.7)$$

平均ヌセルト数は円管内の発達した乱流の平均ヌセルト数に一致する。

$$N_{um} = 0.023 R_\theta^{0.8} P_r^{0.4}$$

またタービュレンスプロモーター挿入管の平均熱伝達率と比較し、タービュレンスプロモーター挿入管では $P/D < 2$ の比較的プロモーターの設置間隔の小さい領域に熱伝達率が最大になる点が存在することを明らかにした。

第6章 タービュレンスプロモーターの層流熱伝達への影響

第4章ではディスク型タービュレンスプロモーター挿入管の乱流伝達について実験的に考察し、ある場合には熱交換器の性能向上に極めて有効になりうることを示した。しかしながら本論文で対象とする高温水用対流型熱交換器や、一般の熱交換器においても管内流体の流れが層流域にある場合が少くない。層流域で使用される熱交換器では熱伝達率が小さいため、小型、高性能の熱交換器を製作するためには何らかの方法により管内の熱伝達率を増加させることが重要になる。本章はディスク型タービュレンスプロモーターの層流熱伝達への影響について実験的に考察したものである。

実験は第5章で用いた局所熱伝達率測定用の伝熱管を用いて $d/D = 0.5 \sim 0.8$ の4種類のタービュレンスプロモーターを伝熱管入口に一個挿入したときの局所熱伝達率の変化の様相、および $d/D = 0.6$ の場合についてタービュレンスプロモーターを一定間隔 ($P/D = 2 \sim 8$) で挿入したときの局所熱伝達率の変化の様相を明らかにし、流れの観察からこれを説明した。

また同一長さの円管と比較した場合には、円管内の層流では流れが半径方向の速度成分を持たないためタービュレンスプロモーターによる乱れの影響が著しく、タービュレンスプロモーター挿入管の平均熱伝達率は著しく増加し、ポンプ動力を基準にして比較した場合にも層流域においてはタービュレンスプロモーターを挿入する方法は極めて有効であることを示した。

第7章 レイノルズ数 $10^2 \sim 10^5$ におけるディスク型タービュレンスプロモーターの熱伝達の総括

本章は管内層流および乱流熱伝達におよびディスク型タービュレンスプロモーターの影響について、平均熱伝達率およびポンプ動力を基準とした有効性を総括したものである。すなわち、タービュレンスプロモーター挿入管の平均ヌセルト数のレイノルズ数による変化は、円管内の層流熱伝達における $1/3$ 乗の勾配からレイノルズ数の増加とともに連続的に勾配を増し、乱流の 0.8 乗の勾配に滑らかに接続すると考えられる。またポンプ動力を基準としたタービュレンスプロモーター挿入管と円管の平均熱伝達率の比は、層流域においては2に近い値を示すが、レイノルズ数の増加とともに平均熱伝達率の増加割合はしだいに低下し、乱流域 ($Re > 10^4$) では平均熱伝達率の比は1以下になる。したがってタービュレンスプロモーターを管内に挿入する方法は、とくに小流量の場合に有効であり、 $Re < 10^4$ ではエネルギー的な見地からも有効である。

また第4章の乱流熱伝達と第6章の層流熱伝達を滑らかに接続することにより，本研究の中間領域，つまり遷移域から低レイノルズ数の乱流域におけるタービュレンスプロモター挿入管の熱伝達特性を推定できる。

第8章 結 論

各章に述べた結論をまとめたものである。

すなわち，本論文はこれまで研究の不十分であった対流型熱交換器の二三の問題について検討すると同時に，小型，高性能の対流型熱交換器を開発するための指針を与えるものとする。

審 査 結 果 の 要 旨

対流型熱交換器の伝熱工学的研究は、ほぼ完成の域に達しているが、最近の大気汚染問題から発生する集中暖冷房方式は、熱交換器の高性能化に対し、さらに新しい問題を提示し、厳密な解析を要求しつつある。本論文は以上の観点に立って熱交換器の外部流れに関して限定空間における水平円柱からの自然対流熱伝達、内部流れに関しては熱伝達をともなう粘性流体の不安定現象、およびディスク型タービュレンスプロモーターによる熱伝達率の促進などの諸問題の研究を行ったもので、全編 8 章から成立っている。

第 1 章は序論で従来の研究結果と本研究の必要性を述べている。

第 2 章はケーシングを有する対流型熱交換器の自然対流熱伝達に関連して垂直な断熱平行平板中におかれた水平円柱からの自然対流熱伝達について実験的に研究し、断熱平行平板と水平円柱の干渉を明らかにしている。

第 3 章は熱伝達をともなう粘性流体の円管内の圧力損失について理論的に考察し、粘性係数の温度変化が著しい液体では圧力損失と流量の関係が極大値と極小値をもつ不安定な領域が存在することを解析し、実験的にこれを確認している。

第 4 章は熱伝達率を増加させる一方法として円管内にプロモーターを挿入したときの圧力損失特性と乱流熱伝達に関する実験的研究である。とくに工夫された伝熱管を用いてのプロモーター後方の局所熱伝達率の分布についての測定結果は新しい知見を与えている。

第 5 章はプロモーターの設置間隔を小さくしたときの極限としての同心二重円管からの乱流熱伝達に関する実験的研究である。温度助走区間における局所熱伝達率、発達した領域の熱伝達率および平均熱伝達率について考察し、その結果をプロモーター挿入管と比較している。

第 6 章はプロモーターの層流熱伝達におよぼす影響に関する実験的研究であり、プロモーター挿入管内の光学的方法による流れの様相から熱伝達の様相を検討し考察を加えている。

第 7 章は管内層流および乱流熱伝達におよぼすプロモーターの影響について平均熱伝達率およびポンプ動力を基準とした有効性を総括したものである。

第 8 章は結論である。

以上要するに、本論文は高性能熱交換器の二、三の問題に対し、新しい知見を加えていると同時に、設計開発のための指針を与えるものであって、伝熱工学上貢献するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。